

## Сильная связь экситонов в микрорезонаторах GaN гексагональной формы

© А.В. Белоновский<sup>1,2</sup>, Г. Позина<sup>4</sup>, Я.В. Левитский<sup>2,3</sup>, К.М. Морозов<sup>1,2</sup>, М.И. Митрофанов<sup>3</sup>,  
Е.И. Гиршова<sup>1,2,3</sup>, К.А. Иванов<sup>2</sup>, С.Н. Родин<sup>3</sup>, В.П. Евтихий<sup>3</sup>, М.А. Калитеевский<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Академический университет,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Linköping University,  
SE-58183 Linköping, Sweden

E-mail: leha.s92.92@gmail.com

Поступила в Редакцию 16 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 20 сентября 2019 г.

Принята к публикации 20 сентября 2019 г.

Методом селективной газофазной эпитаксии выращены плоские микрорезонаторы GaN гексагональной формы. Проводилось измерение спектров низкотемпературной катодолуминесценции на сканирующем электронном микроскопе. В полученных спектрах видно огромное расщепление Раби ( $\sim 100$  мэВ). Выполнено численное моделирование распределения интенсивности мод резонатора гексагональной формы. Некоторые моды могут иметь сильную пространственную локализацию, приводящую к сильной связи с экситоном и огромному расщеплению Раби. Теоретически мы рассчитали долю экситонов в поляритонных модах, которая коррелирует с интенсивностью экситонного излучения, связанного с этими модами, для микрорезонаторов гексагональной формы. Таким образом, получен вид зависимости вероятности излучения от собственных частот структуры.

**Ключевые слова:** расщепление Раби, экситон, нитрид галлия, микрорезонатор.

DOI: 10.21883/FTP.2020.01.48780.9257

### 1. Введение

Исследование экситонных поляритонов в микрорезонаторах началось с новаторской работы Вайсбуша в 1992 г. [1]. В работе [1] наблюдалась сильная связь между экситонами в квантовой яме и собственными фотонными модами планарного микрорезонатора. Приблизив энергию фотонной моды к энергии экситонного резонанса в квантовой яме в спектре отражения авторы наблюдали два ярко выраженных провала. Эти провалы соответствуют поляритонным модам системы. Величина такого расщепления называется расщеплением Раби. Эта работа привела к обширным исследованиям в области сильной связи во взаимодействии света и вещества в полупроводниковых микрорезонаторах в течение последних трех десятилетий [2–4]. Помимо локализации света в одном направлении, удалось также локализовать свет в двух [5] и трех направлениях [6]. Усиление пространственной локализации фотонных состояний может привести к существенному изменению характера взаимодействия фотонных и экситонных мод. Исследования в области сильной связи между фотонами и экситонами находят обширное применение в создании оптоэлектронных и фотонных приборов, в частности в создании источника одиночных фотонов и вертикального лазера.

Традиционный подход к изготовлению наноструктур заключается в уменьшении размера исходных структур травлением или литографией. Однако в последние годы активно развивается альтернативный подход, основанный на выращивании нанообъектов из атомов и молекул сразу необходимой формы и размеров. Одним из примеров такого подхода является селективная газофазная эпитаксия. В работе [7] показана возможность формирования методом селективной газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) различных субмикрометровых объектов из GaN. В частности, данным методом могут выращиваться нановискеры [8].

Целью данной работы являлось исследование оптических свойств гексагональных структур GaN, выращенных методом ГФЭМОС.

### 2. Результаты и обсуждение

Для формирования гексагональных структур на подложке сапфира сначала выращивался слой GaN методом ГФЭМОС. Затем на поверхность слоя наносилась маска из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . В маске вытравливались окна в виде колец с помощью сфокусированного пучка ионов Ga. После формирования окон осуществлялся селективный рост GaN методом ГФЭМОС. В результате получали структуры GaN гексагональной формы.

На рис. 1 представлен один из полученных микро-резонаторов. Нормаль, проведенная к грани структуры, совпадает с направлением высокой симметрии кристалла. Боковая внешняя сторона имеет размер 3.5 мкм, боковая внутренняя сторона — 1.6 мкм, высота структуры равна 1 мкм, толщина обеих стенок структуры составляет 0.5 мкм. Данная структура исследовалась методом низкотемпературной катодолуминесценции (рис. 2). В спектре можно увидеть три ярко выраженных пика при энергиях 3.23, 3.33, 3.43 эВ. Полная ширина полосы на половине высоты составляет  $\sim (70-90)$  мэВ. Энергия экситонного резонанса для слоя GaN равняется 3.43 эВ [9]. Таким образом, можно заметить, что данные пики находятся ниже по энергии относительно экситонного резонанса. Спектры подобной формы были получены и для других выращенных гексагональных структур. Поскольку методика получения данных структур одинакова и материал один и тот же, можно заключить, что различие в спектрах люминесценции может быть обусловлено влиянием структуры оптических мод микро-резонатора на моду экситонного резонанса. Подобное расстояние между пиками ( $\sim 100$  мэВ) наблюдалось и

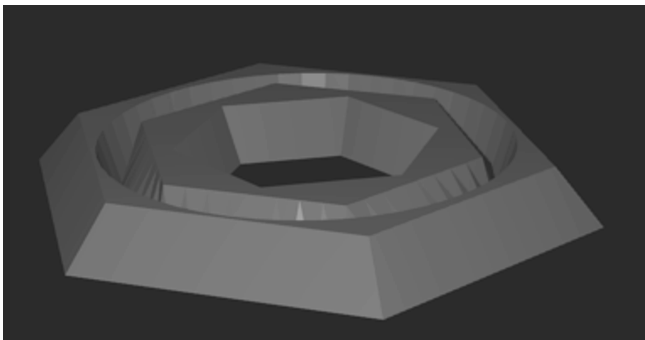


Рис. 1. Изображение гексагонального микрорезонатора GaN.

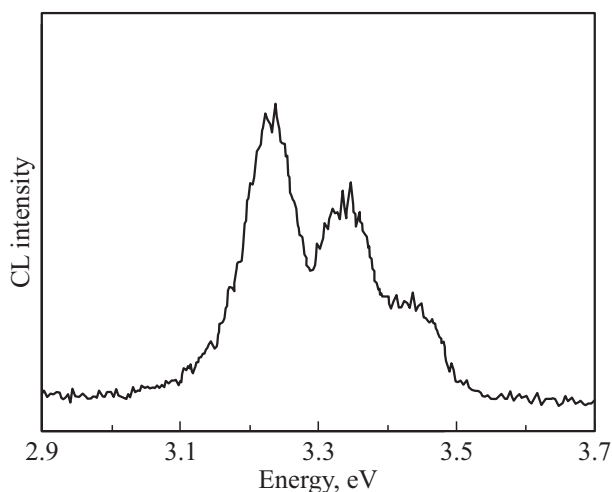


Рис. 2. Спектр низкотемпературной катодолуминесценции (CL). Температура измерений 10 К.

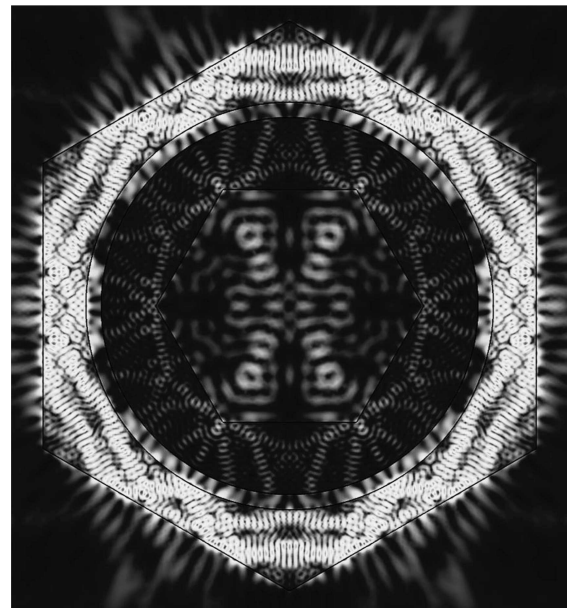


Рис. 3. Распределение напряженности электромагнитного поля мод внутри плоского гексагонального микрорезонатора GaN.

в работе [10], где исследовался режим сильной связи в микрорезонаторах GaN.

Для исследования вопроса о возможной реализации сильной связи в резонаторах такой формы и такого размера ( $\sim 7$  мкм) сначала следует изучить структуру фотонных мод гексагонального GaN-микрорезонатора. Поскольку размер структуры достаточно велик относительно длины волны, исследование в трех измерениях представляет весьма трудоемкую задачу, поэтому в данной статье будет показано двумерное моделирование структуры. Энергии мод резонатора, а также их добротности и пространственное распределение интенсивности были получены путем решения уравнения Максвелла с использованием численных расчетов плоского гексагонального микрорезонатора. Параметры модели были подобраны близкими к реальным. На рис. 3 показано распределение напряженности электромагнитного поля. Энергия моды равна 3.35 эВ, а добротность  $Q = 1150$ . Видно, что на краях структуры может локализоваться электромагнитное поле. На рис. 4 показано распределение добротности собственных мод по энергиям, на рис. 5 изображена гистограмма распределения мод по добротностям. Из рис. 4, 5 видно, что большинство собственных мод имеет низкое значение добротности. Тем не менее существует небольшая вероятность появления высокодобротных мод.

Вероятность взаимодействия излучателя с модой резонатора определяется коэффициентом Парселла

$$F_p = \frac{3}{4\pi^2} \frac{\lambda^3}{V} Q, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны в среде резонатора,  $V$  — модовый объем. Для двумерного моделирования мы можем ввести двумерный аналог коэффициента

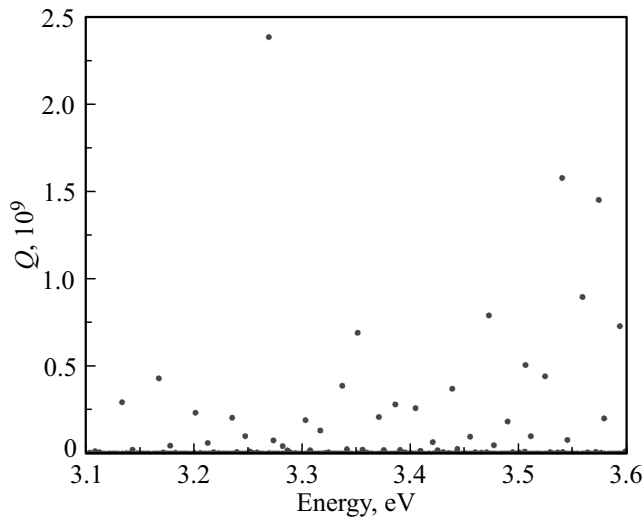
$$F = \frac{\lambda^3}{S} Q. \quad (2)$$

Поскольку  $F \propto Q$ , существует достаточно мало мод, характеризуемых высоким коэффициентом Парселла и потому эффективно взаимодействующих с экситоном.

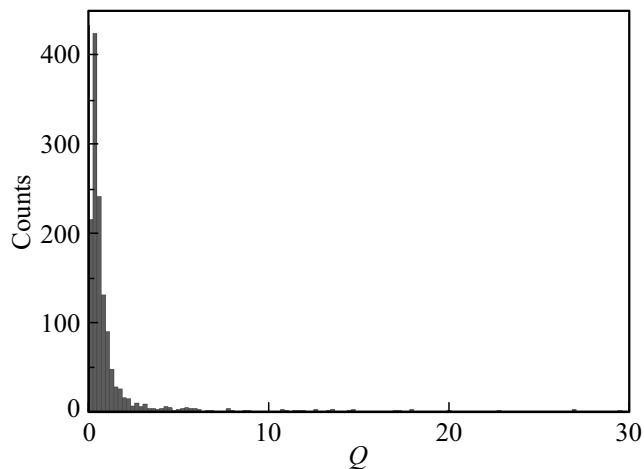
Для количественного описания взаимодействия экситона с модами микрорезонатора удобно воспользоваться формализмом вторичного квантования. Гамильтониан системы в приближении вращающейся волны [11] есть

$$\mathcal{H} = \hbar\omega_0 \hat{x}^+ \hat{x} + \sum_k \hbar\omega_k \hat{c}_k^+ \hat{c}_k \sum_k \hbar(g_k \hat{c}_k \hat{x}^+ + g_k^* \hat{c}_k^+ \hat{x}), \quad (3)$$

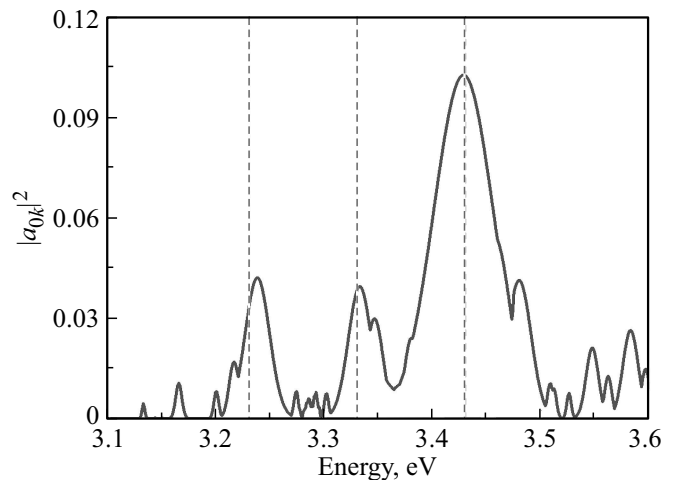
где  $\hbar\omega_0$  — энергия экситона,  $\hbar\omega_k$  — энергия  $k$ -ой фотонной моды,  $g_k \approx \sqrt{F}$  — константа взаимодействия между



**Рис. 4.** Добротности и энергии собственных мод плоского гексагонального микрорезонатора GaN.



**Рис. 5.** Гистограмма, иллюстрирующая распределение мод резонатора в зависимости от величины  $Q$  для плоского гексагонального микрорезонатора GaN.



**Рис. 6.** Энергетическая зависимость экситонного вклада  $|a_x|^2$  в поляритонное состояние  $|a_{0k}|^2$  для плоского гексагонального микрорезонатора GaN.

экситоном и  $k$ -ой фотонной модой.  $\hat{x}^+$ ,  $\hat{c}_k^+$  ( $\hat{x}$ ,  $\hat{c}_k$ ) — операторы рождения (уничтожения) экситона и фотона соответственно. Данный гамильтониан можно диагонализировать, тогда он примет следующий вид:

$$\mathcal{H} = \sum_k \hbar\lambda_k \hat{p}_k^+ \hat{p}_k, \quad (4)$$

где  $\lambda_k$  — собственная мода системы взаимодействия,  $\hat{p}_k^+$  ( $\hat{p}_k$ ) — операторы рождения (уничтожения) поляритонной моды. Вид этого оператора следующий:

$$\hat{p}_k^+ = \hat{x}^+ a_{0k} + \sum_{j=1}^N \hat{c}_j^+ a_{jk}. \quad (5)$$

Квадрат коэффициента стоящего при операторе рождения экситона,  $|a_{0k}|^2$  является экситонным вкладом в поляритонную моду. Спектр экситонного вклада коррелирует с наблюдаемой люминесценцией. Подбирая коэффициент пропорциональности между константой связи и корнем двумерного аналога фактора Парселла, можно получить спектр экситонного вклада (рис. 6), который будет по форме похож на спектр наблюдаемой люминесценции.

Таким образом, несмотря на моделирование модовой структуры в двух измерениях и не имея достаточно точных данных о параметрах самой структуры, мы все же можем получить модельный спектр экситонного вклада, в котором видно расщепление Раби и который по форме совпадает с измеренным спектром катодоллюминесценции.

### 3. Заключение

Мы описали способ получения гексагональных резонаторов методом селективной газофазной эпитаксии.

Их оптические свойства исследованы методом низкотемпературной катодолуминесценции. Полученные спектры люминесценции свидетельствуют о модификации экситонной люминесценции посредством резонатора. Теоретический анализ показывает, что в таких структурах возможен режим сильной связи.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (проект № 16-12-10503).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa. *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 3314 (1992).
- [2] T.A. Fisher, A.M. Afshar, D.M. Whittaker, M.S. Skolnick, J.S. Roberts, G. Hill, M.A. Pate. *Phys. Rev. B*, **51**, 2600 (1995).
- [3] N. Antoine-Vincent, F. Natali, D. Byrne, A. Vasson, P. Disseix, J. Leymarie, M. Leroux, F. Semond, J. Massies. *Phys. Rev. B*, **68**, 153313 (2003).
- [4] A. Kavokin, B. Gil. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2880 (1998).
- [5] M. Radulaski, T.M. Babinec, S. Buckley, A. Rundquist, J. Provine, K. Alasaad, G. Ferro, J. Vučković. *Opt. Express*, **21**, 32623 (2013).
- [6] R. Oulton. *Nature Nanotech.*, **9**, 169 (2014).
- [7] G. Pozina, K.A. Ivanov, M.I. Mitrofanov, M.A. Kaliteevski, K.M. Morozov, I.V. Levitskii, G.V. Voznyuk, V.P. Evtikhiev, S.N. Rodin. *Phys. Status Solidi B*, **256**, 1800631 (2019).
- [8] T. Sato, J. Motohisa, J. Noborisaka, S. Hara, T. Fukui. *J. Cryst. Growth*, **310**, 2359 (2008).
- [9] G. Pozina, S. Khromov, C. Hemmingsson, L. Hultman, B. Monemar. *Phys. Rev. B*, **84**, 165213 (2011).
- [10] K.S. Daskalakis, P.S. Eldridge, G. Christmann, E. Trichas, R. Murray, E. Iliopoulos, E. Monroy, N.T. Pelekanos, J.J. Baumberg, P.G. Savvidis. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 101113 (2013).
- [11] R. Loudon. *The Quantum Theory of Light* (Oxford, Clarendon Press, 1973) p. 184.

Редактор Л.В. Шаронова

## Strong coupling of excitons in hexagonal GaN microcavities

A.V. Belonovskii<sup>1,2</sup>, G. Pozina<sup>4</sup>, I.V. Levitskii<sup>2,3</sup>,  
K.M. Morozov<sup>1,2</sup>, M.I. Mitrofanov<sup>3</sup>, E.I. Girshova<sup>1,2,3</sup>,  
K.A. Ivanov<sup>2</sup>, S.N. Rodin<sup>3</sup>, V.P. Evtikhiev<sup>3</sup>,  
M.A. Kaliteevski<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Academic University,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> ITMO University,  
197101 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Department of Physics, Chemistry and Biology (IFM),  
Linköping University,  
SE-58183 Linköping, Sweden

**Abstract** The GaN planar hexagonal microcavities were grown by the selective vapor phase epitaxy technique. The spectra were measured by the low temperature cathodoluminescence method in scanning electron microscope. The obtained spectra show a huge Rabi splitting ( $\sim 100$  meV). A numerical simulation of the spatial distribution of modes intensities in a hexagonal resonator is presented. Some modes can have strong spatial localization, leading to strong coupling with the exciton and huge Rabi splitting. Theoretically, we calculated the fraction of excitons in polariton modes, which correlates with the intensity of exciton radiation associated with these modes, for microcavities of a hexagonal shape. Thus, we have obtained the form of the dependence of the radiation probability on the eigen frequencies of the structure.